

先端翼付き鋼管杭の引抜き抵抗特性に関する実験的研究

Experimental study on the drawing resistance characteristics of steel pipe pile with tip wings

大塚 久哲*, 棚邊 隆**, 土渕 貴臣***, 山崎 智彦****, 武本真弓*****

Hisanori Otsuka, Takashi Tanabe, Takaomi Dobuchi, Tomohiko Yamasaki, Mayumi Takemoto

* 工博 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

** JFE エンジニアリング(株) シビルエンジニアリング部 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1)

(九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 博士課程)

*** 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

**** 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

***** 福岡市役所 都市計画部 都市計画課 (〒810-8620 福岡市中央区天神1-8-1)

Wing piles, which have different end shape, are expected for better drawing resistance force compared to existing straight pile types. However, drawing resistance calculation formula of these piles has not yet established. The authors try to clarify the drawing resistance mechanism of these piles, and propose the basic experimental results useful for the design of them. In this study, vertical pulling tests in two-layer sand were carried out for four parameters. These are end shapes of piles, loading methods (monotonous pulling loading, static cyclic loading, dynamic cyclic loading), pre loading pressure, and loading rate.

Key Words: steel pipe pile with the tip wing, drawing resistance force, dynamic cyclic loading

キーワード: 先端翼付き鋼管杭, 引抜き抵抗, 動的交番載荷

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災以前は、ビル・橋梁・港湾構造物など上部構造物を支える下部構造物は、上部構造物に比べ比較的安全と考えられていた。それまでの災害事例を見ても上部構造の被害が中心であり、基礎の災害事例の報告はほとんどなかった。しかし、阪神・淡路大震災では基礎にまで被害が及んだことが明らかとなったため¹⁾、現在では大地震時における基礎の耐震設計の重要性が認識されるようになった。

このような社会的状況の変化に伴い、杭の載荷試験方法の基準である地盤工学会の「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」²⁾が2002年に改定された。改定以前は静的な一方向載荷試験方法のみ記載されていたが、改定後は交番載荷や動的な載荷試験についても記載されるようになった。このことは、杭基礎に関しても、大地震を想定することにより、今まであまり考えられていなかった押し込みと引抜きの繰り返し荷重下の復元力特性についても考慮する必要が出てきたことの表れと思われる。しかし、例えば現在、道路橋示方書³⁾に定められている杭の許容支持力は、一方向の載荷試験で得られた第2限界抵抗力²⁾(杭先端直径の10%変位内での最大荷重)に地震時の安全率を考慮したものであり、大地震時を想定した交番試験や動的試験結果によって求められたものではない。

ところで、風力発電タワー・送電鉄塔などの塔状構造物では、風荷重・地震荷重・架線張力などに起因してその基部

に大きな転倒モーメントを生じる。この転倒モーメントに対しては、主として基礎自重を抵抗要素として設計することが一般的であり、基礎フーチングは強度上の必要断面を大きく上回る寸法に設計されている場合が多い。

一方、先端翼付き鋼管杭(以下、翼杭と呼称)はその先端形状により、既往の直杭に比べて大きな引抜き抵抗力が期待される。事例は少ないものの風力発電施設の塔基礎などにおいて、その引抜き抵抗力を転倒モーメントに対する抵抗要素として設計に採り入れて基礎工事の縮減に活用された実績がある。ただし、翼杭の先端部における引抜き抵抗力の算定式は未整備であり、この事例においては、現地引抜き試験によりその耐力を確認した結果を用いている。今後、翼杭の先端部における引抜き抵抗機構が解明されれば、より合理的な翼杭設計法を提案することが出来ると考えられる。

杭の交番載荷実施例は数少ないが、大塚⁴⁾らは直杭の交番載荷実験を実施し、載荷方法による支持力特性の違いについて検討している。それによると粘性の小さい地盤条件の場合には、地震時の杭の動的な挙動を静的な交番載荷から比較的精度良く推測されることや、交番載荷の抵抗力は載荷サイクルが進むにつれて一方向の抵抗力より低下していくことなどが報告されている。

翼杭の引抜き試験の実施例はこれまで幾つか報告されており、押し込み力に比べ引抜き力は小さくなる傾向があること、翼の深度(拘束圧・密度)により破壊モード(全般的破壊・局所破壊)が変わること⁵⁾⁶⁾、引抜き力は土のせん断力が支配的であることなどが示されている。また、拡張杭の全引

抜き抵抗は、初めは周面摩擦として発揮し、引抜き荷重の増加に伴い底部の抵抗の寄与する割合が増大するといったことも報告されている⁷⁾。また、一翼杭或多翼杭の引抜き試験⁸⁾も報告されているが、これらは一方向引抜き試験が多く、交番载荷や動的な試験の例はほとんどない。

このような状況を踏まえ、本研究では翼杭の引抜き抵抗機構を解明し、より合理的な翼杭の耐震設計法の開発に資するため、砂地盤を作成し、杭の先端形状、载荷方法、上載圧及び荷重の载荷速度をパラメータとした翼杭の引き抜き試験及び交番载荷試験を実施したのでその結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 実験装置

写真-1に今回用いた実験装置を示す。土槽は、内径1000mm、深さ1200mmの円柱形である。土槽の内側側面には、砂との摩擦を軽減させるためグリスを塗り、テフロンシートを貼り付けた。また、内側側面に底部からの高さを100mm単位で記し、地盤作成時の目安とした。

载荷フレームは土台・支柱・反力梁から構成されており、载荷中は土槽と土台を固定した。本実験では、20kNハイブリッドアクチュエータを用いて鉛直载荷実験を行い、アクチュエータは反力梁に固定している。

杭頭荷重はアクチュエータ下端に取り付けたロードセルによって測定した。

本実験では、作成する模型地盤に上載圧をかけて、地表面上に等分布荷重を加えることにより、杭の想定設置深さを変えられるようにしている。今回は50kPa、100kPaの2種類の上載圧で試験を行ったが、それぞれ3.38m及び6.76mの深さを加味したものと等価である。上載圧負荷装置は、エアコンプレッサに接続して、空気圧により上載圧を負荷するもので、直径1000mmのドーナツ形状をしたゴム製空気袋である。図-1に上載圧負荷装置及び土槽に設置した状態を示す。

2.2 地盤の作成

模型砂地盤は、ノズルから投下される砂をネットに接触させ砂を分散させて撒きだす「ノズル・ネット法 (NN法)」⁹⁾により作成した。地盤の作成装置を図-2に示す。これは「相対密度の再現範囲が広く、かつ再現性が確保できる」「装置及び作成手法が簡便で、作成に比較的時間を要しない」「作成した地盤を乱すことなく平面に整えることができる」等の条件を満たしており、杭を設置した状態での地盤作成に適している。ノズルやネットの高さ、ノズルに装着するロートの大きさを変化させることにより、任意の相対密度の地盤を作成することができる。

本実験では2層地盤を作るため、上層と下層で地盤の固さを変えなければならない。砂の落下高さが大きいほど固い地盤を作成できるが、地盤からネットまでの高さが700mmを超えると、相対密度に変化が見られないため、下層作成時には地盤からネットまでの高さを700mmと設定した。また、ノズルの中にロートを装着した方がしない場合

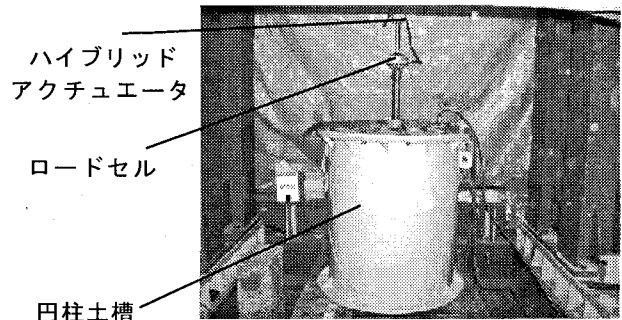


写真-1 実験装置

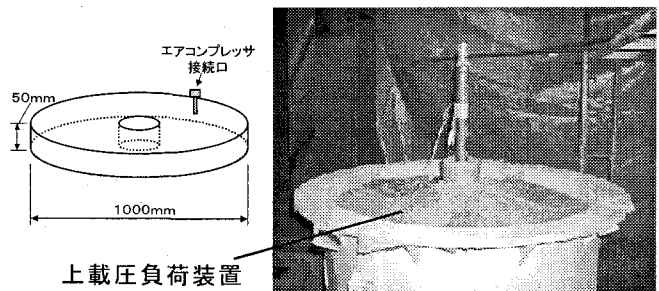


図-1 上載圧負荷装置と設置状態

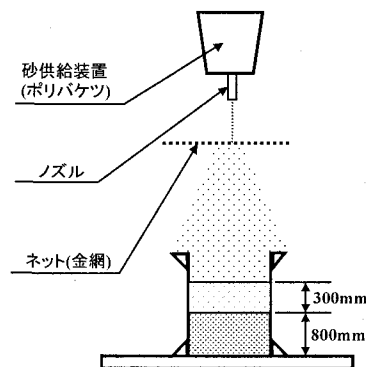


図-2 地盤作成装置

よりも固い地盤が作成できるため、ロート付きノズルを付けた容器で、砂供給装置の下で取り外しが出来るものをあらかじめ用意しておき、下層地盤の作成時にのみ、その容器を装着した。

2.3 地盤条件

使用した砂試料は、熊本硅砂6号である。砂試料の物性を調べるため、土粒子比重試験、最大・最小密度試験、粒度試験を行った。その結果を表-1に示す。

表-1 砂の物性試験結果

試料名	熊本硅砂6号	土粒子密度 G_s	2.607 g/cm ³
最大密度 $\rho_{d, \max}$	1.494 g/cm ³	平均粒径 D_{50}	0.38 mm
最小密度 $\rho_{d, \min}$	1.203 g/cm ³	均等係数 U_c	1.69

模型地盤を作成する時、地盤の性質を表す尺度の一つである相対密度を評価基準とするのが一般的である。今回の実験では、上層の相対密度は80%程度、下層の相対密度は100%程度とした。求めた相対密度と上載圧よりN値の算出を次式により行った¹⁰⁾。

$$Dr = 21 \times \frac{N}{\sigma'_v + 0.7} \quad \begin{array}{l} Dr : \text{相対密度}(\%) \\ \sigma'_v : \text{上載圧}(\text{kgf/cm}^2) \end{array} \quad N : N \text{ 値}$$

上載圧50kPaをかけた時は支持層のN値が30程度に、100kPaかけた時はN=45程度になる。一方、上層は支持層よりもN値が小さく、上載圧に応じてそれぞれN=15程度及びN=25程度となる。

2.4 試験杭の種類と杭の設置方法

試験杭は、杭先端の形状による支持力特性の比較を行うため、先端に半円を互い違いに付けた先端翼付き鋼管杭（以下、翼杭と呼称）、先端に何も付いていない鋼管杭（以下、直杭と呼称）、直杭の先端に翼杭の半円と同じ径の円盤を付けた杭（以下、円盤杭と呼称）の3種類とした。それぞれ杭径は50.8mmで、杭長は1000mmである。また、翼杭と円盤杭の先端径は101.6mm、直杭の先端径は50.8mmである。それぞれの概略図を図-3に示す。

実際の杭の施工では、翼杭は回転貫入させて設置するが、今回は回転貫入ではなく予め翼を固定した状態で地盤を作成していく方法を採用した。これは、後述のように杭先端形状・載荷方法・周波数・上載圧をパラメータにした比較を行うことが目的であるため、実際の施工方法を再現することは必ずしも必要がないと判断したからである。

杭の設置状態と土圧計の配置を図-4に示す。上層は300mmで下層は800mmとし、下層への杭の根入れ深さは100mmとした。この根入れ深さは、翼杭は杭先端の支持層に先端翼径分だけ根入れして施工することを踏まえて決定した。また、上層・境界面・下層にそれぞれ2つずつ土圧計を設置した。

2.5 試験ケース

今回の実験では「先端形状による比較」・「載荷方法による比較」・「載荷周波数による比較」・「上載圧による比較」を検討するため、表-2に示すように11ケースの実験を行った。ここでケース1～7については、エアーバック（上載圧負荷装置）により上載圧を負荷する際、その圧力値はコンプレッサの吐き出し口で計測した。ケース8～11については上載圧の影響による比較を行うために詳細な値を得るため、エアーバックの挿入口で計測した。載荷方法は、地盤工学会「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」²⁾に準拠し一方向単調引抜きと交番載荷の2種類を行った。各載荷方法の制御方法を以下に示す。

①単調引抜き載荷

載荷速度は0.01mm/sで、変位20mmまで引抜く。

②静的交番載荷

載荷速度は0.01mm/s。変位振幅は±0.5, 1, 2, 4, 10mmの5段階で変化させ、各変位振幅における繰返し回数（以下、サイクル数と呼称）が増加すると、それに伴って荷重が減少することを確認するため、同一変位振幅におけるサイクル数を3とした。また、今回は引抜き力に着目しているため載荷は杭を引く方向（以下、引き側と呼称）から開始した。静的交番載荷の変位-時間関係の概要を図-5に示す。

③動的交番載荷

載荷する荷重の周波数は0.5Hz、1Hz、2Hzの3種類で行った。この時、載荷速度をHzで設定したため、各変位振幅で載荷速度が異なり、変位が大きくなるにつれ載荷速度も速

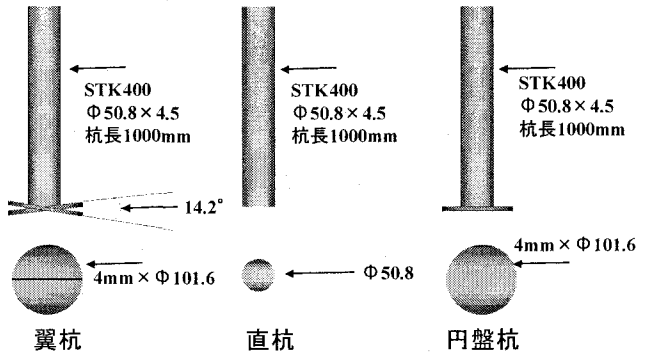


図-3 試験杭

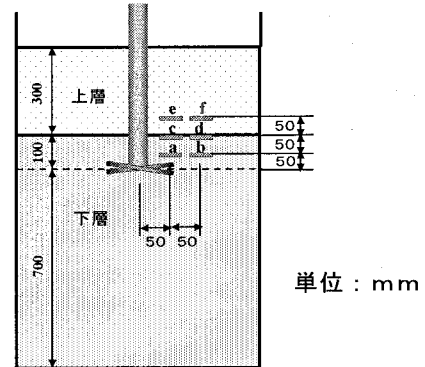


図-4 杭の設置状態と土圧計の配置

表-2 試験ケース

ケース	杭の種類	載荷方法	上載圧 (kPa)	載荷速度及び周波数	サイクル数	変位振幅 (mm)
1	翼杭	単調引抜き	(50)	0.01mm/s	-	-
2	直杭	単調引抜き	(50)	0.01mm/s	-	-
3	円盤杭	単調引抜き	(50)	0.01mm/s	-	-
4	翼杭	静的交番	(50)	0.01mm/s	3	±0.5, 1, 2, 4, 10
5	直杭	静的交番	(50)	0.01mm/s	3	±0.5, 1, 2, 4, 10
6	翼杭	動的交番	(50)	0.5Hz	3	±0.5, 1, 2, 4, 10
7	翼杭	動的交番	(50)	1Hz	3	±0.5, 1, 2, 4, 10
8	翼杭	動的交番	50	0.5Hz	1	±0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15
9	翼杭	動的交番	100	0.5Hz	1	±0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15
10	翼杭	動的交番	50	1Hz	1	±0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15
11	翼杭	動的交番	50	2Hz	1	±0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15

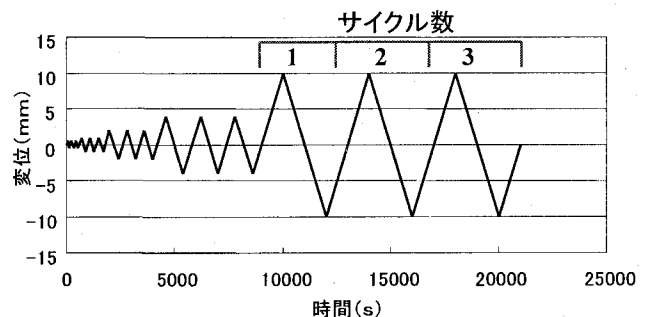


図-5 静的交番の変位-時間関係

くなる。また、サイクル数はそれぞれ3サイクル及び交番荷重に対する復元力特性評価に主眼をおいた1サイクルの2種類で試験を行った。載荷は引き側から開始した。

以上の載荷方法に対してまず、杭の「先端形状による比較」をするため、直杭・円盤杭・翼杭の単調引抜き試験と直杭・翼杭の静的交番載荷試験を行った。「載荷方法による比較」では翼杭の単調引抜きと静的交番載荷及び載荷速度

の速い動的交番載荷を比較した。ここで動的交番載荷は同一変位振幅において3サイクルで行った。また、動的載荷試験における載荷周期の違いを検討するため「周波数による比較」では翼杭で0.5Hz, 1Hz, 2Hzの3種類の動的交番載荷を行い載荷速度の影響について検討を行った。ここで動的載荷試験は、同一変位振幅において1サイクルの交番載荷を行った。「上載圧による比較」では翼杭のみ0.5Hz 動的交番載荷を行い、上載圧を50kPa, 100kPaの2種類で試験を行い、その影響について検討を行った。ここでも同一変位振幅においては1サイクルの動的交番載荷を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 先端形状による比較

「先端形状による比較」では、単調引抜き試験と静的交番載荷試験を行った。ここでの上載圧はエアーコンプレッサの吐き出し口で計測した値である。まず、単調引抜き試験の結果について述べる。

図-6にケース1(翼杭)、ケース2(直杭)、ケース3(円盤杭)の引き側についての杭頭荷重を示す。翼杭については、変位と共に荷重は単調に増加し、荷重は最大で2.5kNとなった。円盤杭についても同様の傾向である。一方、直杭については、2mm付近で荷重は最大値約0.3kNを示し、その後緩やかな減少傾向となった。

表-3にケース1, 2, 3についての第1限界抵抗力($\log P$ (荷重)- $\log S$ (変位)曲線に現れる明瞭な折れ点)及び第2限界抵抗力(引抜き抵抗が最大となった時の荷重。ただし、先端変位量が先端直径の10%以下の範囲)を示す。同表より翼杭と円盤杭はほぼ同じ値になっており、同径の先端を持つ翼杭と円盤杭は、同じ引抜き抵抗力を有することが分かる。また、翼杭と直杭の限界抵抗力を比較すると、第1・第2限界抵抗力とも翼杭の方が大きく、今回の実験では両限界抵抗力とも直杭の約8倍になっている。

図-7は図-4の土圧計cの土圧-変位関係であるが、変位が大きいと翼杭、円盤杭では土圧変動量も大きくなり、直杭では変動量が非常に小さく、図-6に示す杭頭荷重-変位の関係と同様の傾向を示している。図-7では直杭はほとんど土圧が働かず、むしろ負値となっているのに比べ、翼杭と円盤杭の土圧は変位と共に上昇し続けている。これは、直杭は砂と鋼管の摩擦抵抗が主体であるのに対し、翼杭と円盤杭では翼と円盤が支圧的に抵抗しているためであると考えられる。ここで、翼杭と円盤杭で明確な差が現れたのは、翼杭では土圧測定位置が2枚の半円を傾けて互い違いに付けたちょうどその切れ目の線上にあり、引抜き時に大きな支圧力を受けなかったためと思われる。

図-8はケース1~3の等価鉛直ばね定数である。等価鉛直ばね定数は、任意の変位における荷重値から算出した正接の値である。ここでも翼杭と円盤杭はほぼ同じ挙動を示し、変位が小さい時は最大で約1.6kN/mmとなり、変位の増加と共に等価鉛直ばね定数の値は減少している。直杭はそれらと比べ等価鉛直ばね定数は小さくなっており、最大で約1.2kN/mmとなっている。等価鉛直ばね定数の減少傾向は直杭の方が急である。

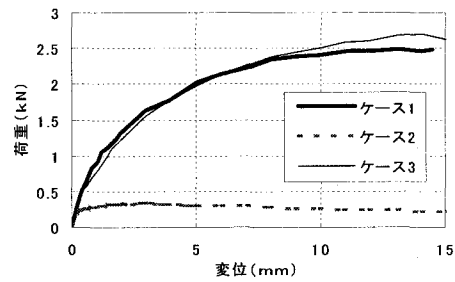


図-6 ケース1, 2, 3における杭頭荷重(引き側)と変位の関係

表-3 限界抵抗力

		荷重(kN)	変位(mm)
翼杭 (ケース1)	第1限界抵抗力	1.84	3.9
	第2限界抵抗力	2.40	10.0
直杭 (ケース2)	第1限界抵抗力	0.23	0.2
	第2限界抵抗力	0.33	2.0
円盤杭 (ケース3)	第1限界抵抗力	1.75	3.6
	第2限界抵抗力	2.50	10.0

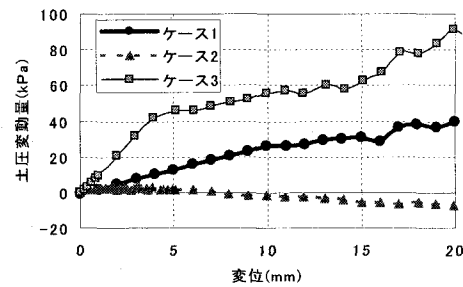


図-7 ケース1, 2, 3における土圧変動(土圧計c)

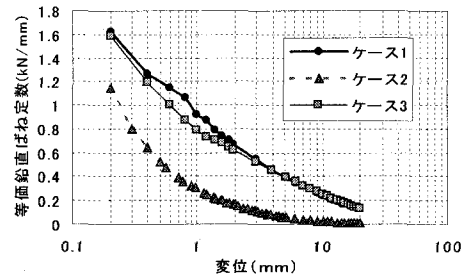


図-8 ケース1, 2, 3における等価鉛直ばね定数

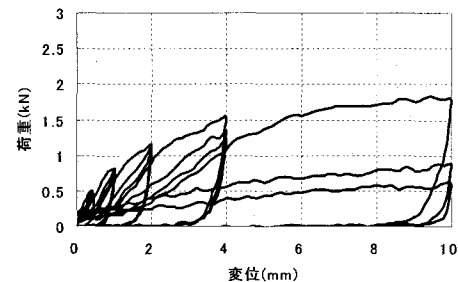


図-9 ケース4における杭頭荷重(引き側)と変位の関係

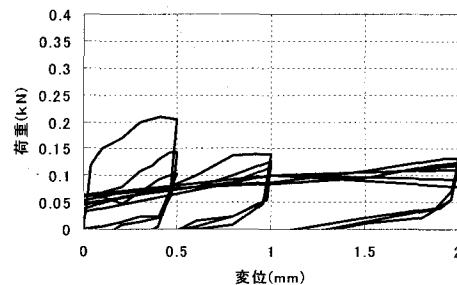


図-10 ケース5における杭頭荷重(引き側)と変位の関係

単調引抜き試験より、

- ①翼杭と円盤杭はほぼ同様の挙動を示す
- ②翼杭は直杭に比べ引抜き抵抗力が大きい杭であることが分かった。

また、翼杭と円盤杭の挙動はほとんど同じであることが分かったため、以下本実験では、翼杭と直杭についてのみ比較を行う。

次に、静的交番载荷の結果について述べる。図-9にケース4（翼杭）の、図-10にケース5（直杭）の引き側についての杭頭荷重を示す。ここでケース5は、荷重が非常に小さかったため、荷重-変位の関係が詳細に分かるよう大きいスケールで図示した。ケース4では、変位の増加と共に荷重は増加しているが、ケース5においては、変位が増加すると荷重が減少している。それぞれの第2限界抵抗力はケース4で1.77kN、ケース5で0.20kNとなっており、静的交番载荷においても翼杭の荷重が直杭の約9倍となり、翼杭が引抜き抵抗力の大きい杭であることが分かる。

等価鉛直ばね定数と変位の関係を図-11に示す。ここでケース4、ケース5ともに1サイクル目に着目して等価鉛直ばね定数を求めた。翼杭については、最小変位0.5mmで等価鉛直ばね定数は最大約1kN/mmとなり変位の増加と共に減少している。直杭については、翼杭に比べ小さく0.5mm変位時0.4kN/mm程度となっている。

以上より、静的交番载荷試験においても単調引抜き試験と同様の結果となったため、载荷方法に関係なく翼杭は直杭に比べ引抜き抵抗力の大きい杭であるといえる。

3.2 载荷方法による比較

「载荷方法による比較」では、単調引抜き試験、静的交番载荷試験、及び载荷荷重の周波数を0.5Hzと1Hzで設定した動的交番载荷試験との比較を行った。また、ここでの上載圧はエアークンプレッサの吐き出し口で計測した値である。

ケース1（翼杭単調引抜き）、ケース4（翼杭静的交番）、ケース6（翼杭動的交番0.5Hz）、ケース7（翼杭動的交番1Hz）の杭頭荷重と変位の関係を図-12に示す。単調引抜き（ケース1）の場合の杭頭荷重が最大となっている。交番载荷のケース4, 6, 7については、ケース4の静的交番で他に比べ若干小さな値を示し、動的交番のケース6, 7はほぼ同程度の値となっている。第2限界抵抗力についてはケース1で2.40kNであるのに対し、ケース4では1.77kN、ケース6とケース7で2.29kNとなっている。ケース4で若干ケース6, 7と比して差異がみられるものの载荷速度の影響は現れにくい結果となった。

図-12を見ると繰返しによる急激な荷重の低下は、静的・動的（0.5Hz）・動的（1Hz）とも、10mmステップの2サイクル目から起こっている。従って、繰返しによる単調引抜き荷重-変位曲線からの乖離現象は、载荷速度に関係なく、単調引抜きで第1限界抵抗力の現れる変位（4mm）を超えた後に起こることが分かる。ここで、交番载荷の変位10mmでの3サイクル目の杭頭荷重と単調引抜きの第2限界抵抗力の比を求めると、0.24～0.41（表-4）となった。

ケース4, 6, 7の等価鉛直ばね定数と変位の関係を図-13

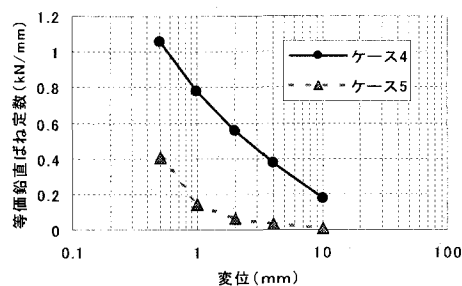


図-11 ケース4, 5における等価鉛直ばね定数

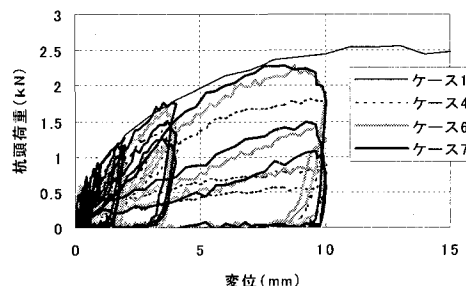


図-12 ケース1, 4, 6, 7における杭頭荷重と変位の関係

表-4 ケース4, 6, 7における変位10mm時の交番载荷3サイクル目と単調引抜きの杭頭荷重比

静的交番(ケース4)	0.248
動的交番0.5Hz(ケース6)	0.325
動的交番1Hz(ケース7)	0.410

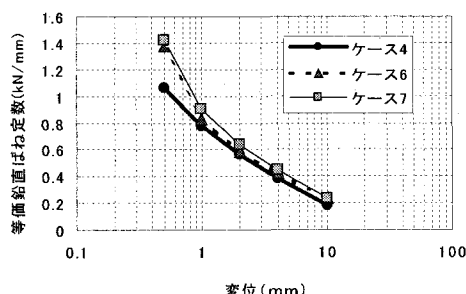


図-13 ケース4, 6, 7における等価鉛直ばね定数

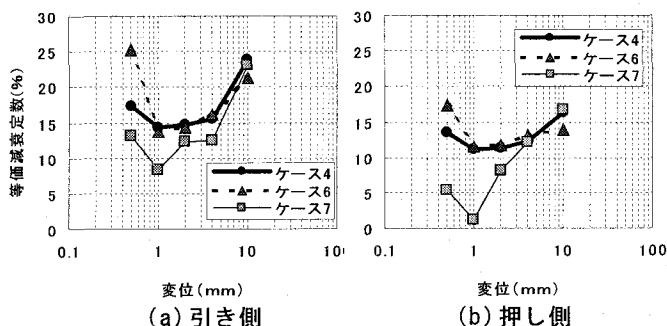


図-14 ケース4, 6, 7における等価減衰定数

に示す。ここで等価鉛直ばね定数は、いずれも1サイクル目に着目して求めた。図-12に示した荷重と同じように静的交番での値は若干小さく、0.5Hz及び1Hzの動的交番はほぼ同程度となっている。静的交番では最大1.1kN/mm、0.5Hz動的交番では最大1.38kN/mm、1Hz動的交番では最大1.42kN/mmとなった。また、ケース4, 6, 7は変位が2mmより大きくなるとほぼ同じばね定数を示し、最大変位10mmでは等価鉛直ばね定数は0.2kN/mmと非常に小さくなっている。従って、設計で用いる等価ばね定数を試験を行って求める場合には、

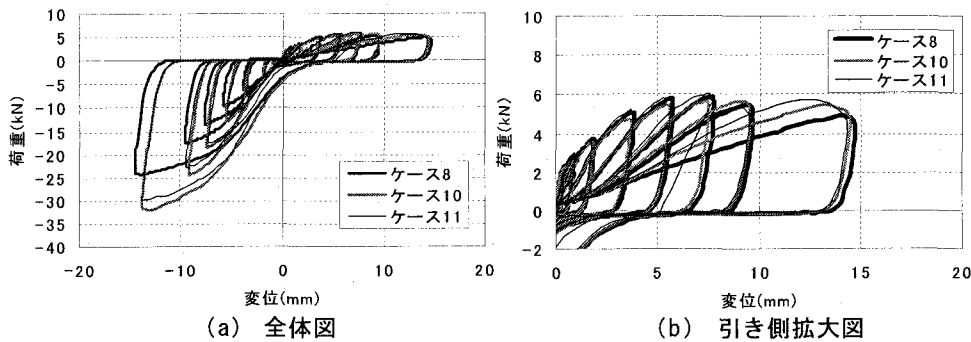


図-15 ケース8, 10, 11における杭頭荷重と変位の関係

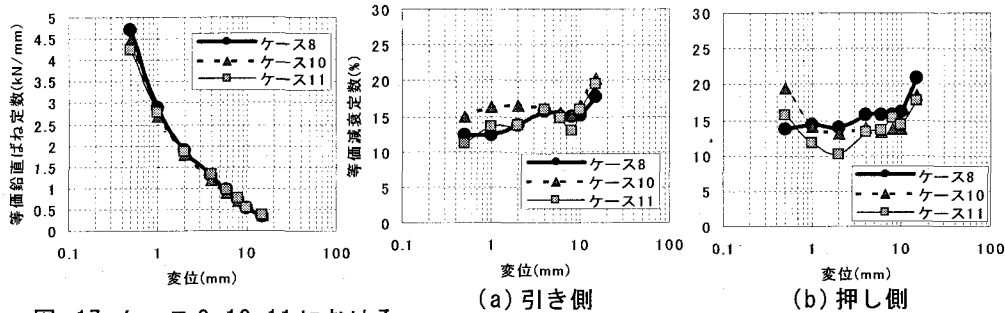


図-17 ケース8, 10, 11における等価鉛直ばね定数

図-18 ケース8, 10, 11における等価減衰定数

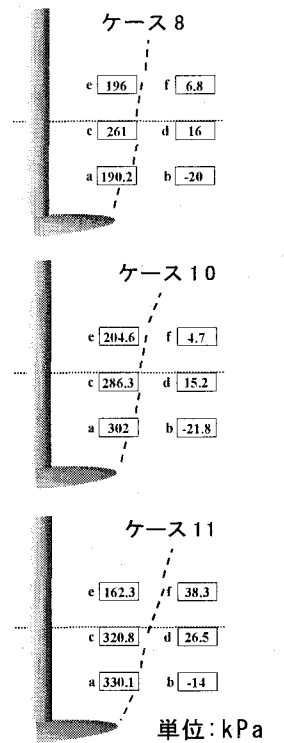


図-16 ケース8, 10, 11における土圧変動分布と破壊の概念図

静的交番試験で求めた方が、安全側に評価できるといえる。

図-14はケース4, 6, 7の等価減衰定数と変位の関係を引き側と押し側について示したものである。ここにおける等価減衰定数は、1サイクル目に着目し、文献²⁾に従って求めた。押し、引きともに一定の傾向を示さなかった。引き側においては静的交番と0.5Hz動の交番では15～25%、1Hz動の交番においては8～23%程度となっている。一方、押し側においては静的交番と0.5Hz動の交番では10～17%、1Hz動の交番においては2～17%程度となっている。また、いずれのケースにおいても引き側は押し側に比べて大きな減衰定数となっている。

以上より、杭と周辺地盤の挙動は荷重速度に依存しておらず、また、サイクル数の増加により荷重が低下することが知られた。繰返しによる単調引抜き荷重-変位曲線からの乖離現象は、荷重速度に関係なく、単調引抜きで第1限界抵抗力の現れる変位を超えた後に起こることも確認された。これらより、第1限界抵抗力を超えるような荷重に対応する変位時においては、繰返しにより抵抗力が急激に減少することに注意が必要である。

3.3 周波数による比較

動的交番荷重試験により「周波数による比較」を行った。ここで荷重荷重の周波数は0.5Hz、1Hz、2Hzの3種類とした。荷重速度をHzで設定したため、各変位振幅で荷重速度が異なり、変位が大きくなるにつれ荷重速度は速くなる。ここでは交番荷重に対する復元力特性評価に主眼をおいていることから各ステップ1サイクルの交番荷重とした。また、上載圧はエアバックの挿入口で計測した値である。

ケース8 (0.5Hz)、ケース10 (1Hz)、ケース11 (2Hz)

の杭頭荷重と変位の関係を全体及び引き側について拡大したものを図-15に示す。押し側の荷重は、ケース8で最大約25kN、ケース10で32kN、ケース11で30kNとなり、ケース8で他の2ケースと比べ少し小さな値となった。引き側について着目すると、ケース8, 10, 11はほぼ同じ挙動を示しており、杭頭荷重は最大で約6kN程度であった。これより、押し側においては多少差異が見られるものの、引き側においては荷重周波数すなわち荷重速度の影響はないといえる。

図-16は図-4に示す土圧計のケース8, 10, 11における最大土圧変動分布を示している。土圧計aが最大値を示した時間における値を示しており、ケース8は荷重開始後8.5秒後、ケース10は4.2秒後、ケース11は2.6秒後の測定値である。いずれのケースも杭側の土圧変動量が大きく、ケース8では最大で261kPa、ケース10で302kPa、ケース11で330.1kPaとなっている。一方、杭から離れたところは全体的に値が小さく、翼に近い位置にあるbでは負の値になっている。これは、荷重により杭先端部が移動するが、その時生じた空隙部に砂が移動しようとするために負の圧力が作用したためと思われる。d, fの土圧変動量が非常に小さい。ケース8, 10では図-16の破線で示すように翼端近傍から鉛直に破壊が起きていると考えられる。一方、ケース11ではfの位置の土圧変動が他の2ケースと比して多少大きく破壊線は若干広がっていると想定される。しかし、その変動量は微量であり、今回行った0.5～2Hz程度の荷重周波数では地盤破壊の形状に差異はほとんど見られないことが分かる。

ケース8, 10, 11の等価鉛直ばね定数-変位関係を図-17に示す。最小変位0.5mm変位時で約4.2～4.7kN/mmとなり若干差異がみられるものの、それ以降の変位時においてはケース8, 10, 11はほぼ同程度の値を示した。1mm変位時は2.6～2.9kN/mm、2mm変位時は1.7～1.9kN/mmとなり徐々に

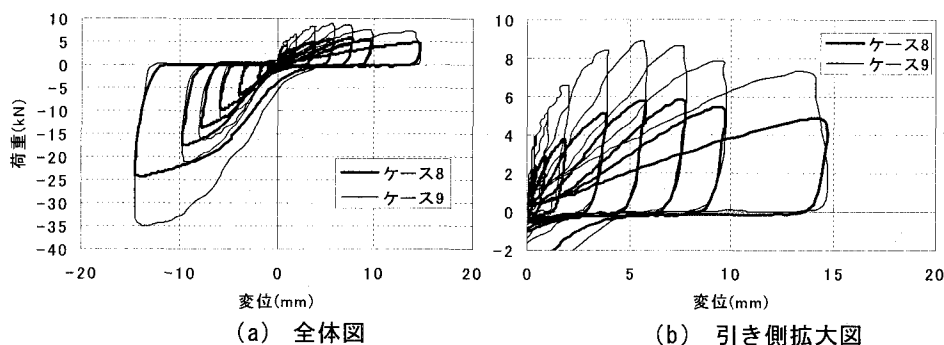


図-19 ケース8,9における杭頭荷重と変位の関係

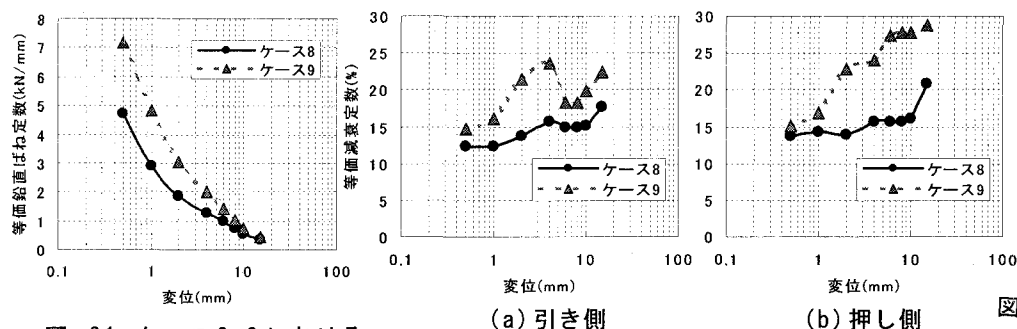


図-21 ケース8,9における等価鉛直ばね定数

図-22 ケース8,9における等価減衰定数

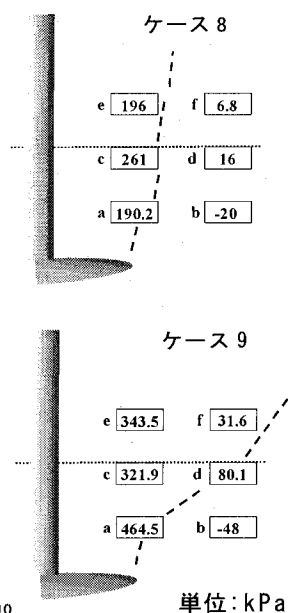


図-20 ケース8,9における土圧変動分布と破壊の概念図

減少している。

図-18にケース8, 10, 11の等価減衰定数-変位関係を引き側と押し側について示した。引き側についてはケース8で13～18%, ケース10で15～20%, ケース11で12～20%程度となり一定の傾向を示さなかった。一方、押し側についてもケース8で14～21%, ケース10で13～19%, ケース11で10～18%程度とばらつきがみられ、等価減衰定数は載荷速度にはほとんど依存しないことが分かる。

これらより、今回のような砂地盤においては載荷周波数、つまり載荷速度が杭の引抜き抵抗に及ぼす影響は、0.5～2Hz程度の載荷周波数の違いでは現れにくいと考えられる。また、地盤の破壊形状においても載荷周波数の差異による影響は見られないことが分かる。

3.4 上載圧による比較

「上載圧による比較」では、載荷荷重の周波数を0.5Hzとし、上載圧を50kPaと100kPaかけた場合の2種類の動的交番載荷試験を行った。ここでの上載圧はエアバックの挿入口で計測した値である。また、前述したようにこれらの上載圧は支持地盤のN値がそれぞれN=30, N=45に対応する。ここでは復元力特性評価に主眼をおいていることから各ステップ1サイクルの交番載荷を行った。

ケース8 (50kPa) とケース9 (100kPa) の杭頭荷重と変位の関係を全体及び引き側について拡大したものを図-19に示す。押し側の荷重はケース8で最大約25kN, ケース9で最大約35kNとなっている。また、押し側では変位の増加と共に荷重が増加していることが分かる。一方、引き側についても、ケース9がケース8に比べ大きくなっており上載圧が大きくなるほど抵抗が大きくなることが分かる。例えばケース8では8mm変位時でみると最大6kN, ケース9で

は最大9kN程度となっている。最大耐力以降の10mm, 15mm変位時においては、荷重ピークは緩やかに減少する傾向となった。また、15mm変位時は原点指向しておらず、地盤が乱され性状が変わったものと思われる。

図-20はケース8,9の最大土圧変動分布を示したものである。ケース8は載荷開始後8.5秒後、ケース9は8.3秒後に測定した値である。ケース9がケース8に比べ大きな値となっており、上載圧が大きいほど土圧変動は大きくなることが知られる。ケース8では前述したように翼近傍で鉛直方向に破壊が起きていると考えられるが、一方、ケース9では杭側とdの位置で土圧の変動量が大きくなっており、上載圧が大きいほど破壊線は広がると考えられる。

ケース8,9の等価鉛直ばね定数-変位関係を図-21に示す。杭頭荷重と同様にケース9がケース8に比べかなり大きくなっている。ケース8では0.5mm変位時約5kN/mm, 1mmで約3kN/mmである。ケース9では0.5mm変位時約7kN/mm, 1mmで約5kN/mmであり、両者ともに変位の増加と共に減少している。また、変位振幅が大きくなるとケース8,9ともほぼ0に漸近する。

ケース8,9の等価減衰定数-変位関係を図-22に示す。押し側、引き側ともに上載圧の大きいケース9がケース8に比べ大きくなっている。引き側においてはケース8が13～18%, ケース9が15～24%程度増加している。一方、押し側においてはケース8が14～21%, ケース9が15～28%程度増加している。

以上より、大きい上載圧をかけるほど、つまり支持層のN値が大きくなるほど杭の抵抗力は強くなり、土圧も大きくなることが分かる。その影響は、地盤の破壊形状にも表れ、上載圧が大きいほど破壊は広がって生じている。ケース8,9の履歴性状は、値は異なるが類似の形状を示している。

4. まとめ

本研究では翼杭の引抜き抵抗機構を解明し、より合理的な翼杭の設計法の開発に資することを目的に、砂地盤を作成し、杭の模型実験を行った。その際、杭の先端形状、荷重方法、杭の上載圧、荷重の荷重速度をパラメータとして、引抜き試験及び交番荷重試験を実施し、それらのパラメータが杭の挙動に及ぼす影響について検討した。本実験により得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 先端に半円を互い違いに付けた翼杭は、直杭の先端に翼杭の半円と同じ径の円盤を付けた円盤杭とほぼ同様の挙動を示した。
- (2) 翼杭は翼が支圧的に抵抗しており、先端に何も付いていない直杭に比べ引抜き抵抗力が大きい杭である。今回の試験では第1、第2限界抵抗力はそれぞれ直杭の約8倍であった。
- (3) 繰返しによる単調引抜き荷重-変位曲線からの乖離現象は、杭の種類や荷重速度によらず、単調引抜きで第1限界抵抗力の現れる変位を超えた後に顕著に現れた。
- (4) 今回のような砂地盤においては、地震時を想定した0.5～2Hz程度の荷重周波数では翼杭の引抜き抵抗力に及ぼす影響はほとんどなかった。また、地盤の破壊形状も荷重周波数の差異による影響はほとんどなかった。
- (5) 翼杭の引抜き抵抗力は上載圧に依存し、上載圧が大きいほど抵抗荷重は大きくなった。また、上載圧によって破壊形状が異なり、上載圧が大きいほど地盤の破壊領域が広がると考えられる。

今回行った先端形状の異なる杭の模型実験により、翼杭の引抜き抵抗特性を概略把握することができた。今後は、翼杭の引抜き抵抗機構に関与すると考えられる翼の径をパラメータにした動的荷重実験も行う予定である。その影響も含めて、上載圧、荷重速度等のパラメータによる抵抗挙動の差異を整理し、交番荷重に対する翼杭の復元力特性の評価方法を提案したいと考えている。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、九州大学工学研究院助手の矢葺亘氏、同技官の中島通夫氏、同是永忠志氏、鹿児島市役所（当時、工学府修士課程在学）の榊豊和氏には実験の実施において多大なるご協力を賜りました。また、同助手の宮森保紀氏には論文のとりまとめに際して貴重なご助言を戴きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 地盤工学会、土木学会 etc：阪神淡路大震災調査報告、第4章基礎構造物、1998.6
- 2) 地盤工学会：地盤工学会基準、杭の鉛直荷重方法・同解説-第一回改訂版-、2002.5
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編、2002.3
- 4) 大塚雅裕、秋田直樹、福井次郎、喜多直之：荷重方法の異なる杭の鉛直荷重模型実験、第37回地盤工学研究発表会、pp.1425～1428、2002.7
- 5) A. Ghaly, A. Hanna: Uplift behavior of screw anchors in sand, Journal of Geotechnical Engineering Vol. 117, No. 5, pp. 773-793, ASCE, 1991.5
- 6) 山田淳、安原一哉、村上哲、柳橋孝博：杭形状の違いによる拡張杭の引抜き抵抗力、第33回地盤工学研究発表会、pp.1437～1438、1998.7
- 7) 文松霖、横山幸満、今泉繁良：砂地盤における模型拡張杭の引抜き抵抗挙動、土木学会論文集、No.535/III-34, pp.127～134、1996.3
- 8) 大和真一、中川宏人、前嶋匡、梅田雅芳：羽根付き鋼管杭の引抜き耐力特性について、第36回地盤工学研究発表会、pp.1567～1568、2001.6
- 9) 島田正夫、土屋勉、菊地ゆかり：ノズル・ネットを用いた模型砂地盤の作製方法、日本建築学会北海道支部研究報告集、Vol.75, pp.21～24、2002
- 10) 地盤工学会：地盤調査法、1995.9
- 11) 山崎智彦、武本真弓：先端翼付き鋼管杭の引抜き耐力に関する模型実験、土木学会第58回年次学術講演会
- 12) 武本真弓、山崎智彦：先端翼付き鋼管杭の引抜き耐力に関する模型実験、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、2002.3

(2003年9月12日受付)